



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Patentschrift  
10 DE 197 28 318 C 1

51 Int. Cl. 6:  
H 02 P 13/00  
G 05 F 1/10  
H 02 M 7/00

21 Aktenzeichen: 197 28 318.7-32  
22 Anmeldetag: 27. 6. 97  
43 Offenlegungstag: -  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 1. 4. 99

DE 197 28 318 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:

Daimler-Benz Aktiengesellschaft, 70567 Stuttgart,  
DE

72 Erfinder:

Janning, Jörg, Dr.-Ing., 12049 Berlin, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

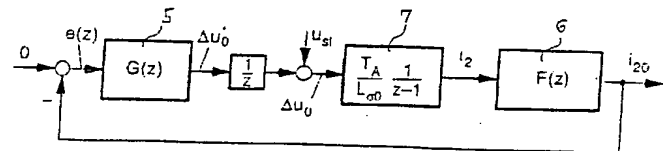
EP 03 70 388 A2

54 Verfahren zur Vermeidung der Sättigung von Einphasentransformatoren durch Gleichflüsse

57 Es wird ein Verfahren zur hochdynamischen Unterdrückung von Gleichflüssen in Einphasentransformatoren angegeben, die mit einer oder mehreren Wicklungen an spannungseinprägende Umrichter angeschlossen sind, wobei diese Umrichter von einer zeitdiskreten Regelung gesteuert werden, deren Stellgröße Sollspannungen sind, die durch geeignete Ansteuerung der Umrichter umgesetzt werden, und wobei diese Regelung einen Strom ( $i_{20}$ ) mit ausreichender Genauigkeit in einer Wicklung des Transformators mißt. Dazu wird erfindungsgemäß der Gleichanteil ( $i_{20}$ ) des gemessenen Stroms ( $i_2$ ) mit einem linearphasigen FIR-Filter (Finite Impulse Response Filter) (6) ermittelt, welches als Tiefpaßfilter mit einer Knickfrequenz entworfen ist, die unterhalb der niedrigsten im stationären Betrieb auftretenden Grundswingungsfrequenz des gemessenen Stroms liegt. Der so übermittelte Stromgleichanteil ( $i_{20}$ ) wird einem Gleichanteil-Regler (5) mit der Z-Übertragungsfunktion

$$G(z) = \frac{\Delta u_0(z)}{e(z)} = \frac{k_F (z - \beta) z^N}{(z - 1) \left( z^N - \frac{k_{FK}}{N} (z^{N-1} + \dots + 1) \right)} \quad (B)$$

zugeführt, in der  $k_F$ ,  $k_{FK}$ ,  $\beta$  Reglerparameter sind und ( $N-2$ ) der Ordnung des FIR-Filters (6) entspricht und wobei die Eingangsgröße  $e$  des Reglers (5) die Regelabweichung aus der Differenz des zu Null vorgegebenen Sollwerts des Stromgleichanteils und des mit dem FIR-Filter (6) ermittelten Istwerts des Stromgleichanteils gebildet wird und wobei die Ausgangsgröße ( $\Delta u_0$ ) des Gleichanteil-Reglers (5) zu den Sollspannungen der Regelung addiert wird.



DE 197 28 318 C 1

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

In der Antriebstechnik werden zur Speisung von Gleichspannungs-Zwischenkreisen aus einphasigen Wechselstromnetzen u. a. Vierquadrantensteller in CTO- oder IGBT-Technik eingesetzt. So wird beispielsweise, wie es Fig. 1 zeigt der netzseitige Stromrichter 1 bei Traktionsumrichtern elektrischer Lokomotiven oder auch der bahnnetzseitige Teilumrichter von Netzkupplungen zur Speisung des  $16\frac{2}{3}$  Hz-Bahnnetzes aus dem 50 Hz-Landesnetz mit einem Strom  $i_1$  häufig mit Vierquadrantenstellern (4QS) ausgerüstet. Ein 4QS besteht aus (hier nicht gezeigten) zwei Brückenzweigen, die unabhängig voneinander unterschiedliche Gleichspannungspotentiale an die Ausgangsklemmen A bzw. B. schalten können. Bei einem 2-Level 4QS ergibt sich somit an den Klemmen A, B eine Ausgangsspannung  $u_{AB}$ , die drei unterschiedliche Spannungsniveaus (0, pos. sowie neg. Spannung  $u_d$ ) annehmen kann. Zur Anpassung der Netzspannung  $u_N$  an die Ausgangsspannung  $u_{AB}$  ist der 4QS über einen Einphasentransformator 2 an das Wechselstromnetz angeschlossen. Die Streuinduktivität des Transformators dient außerdem zur Einkopplung der Netzspannung  $u_N$  und der Ausgangsspannung  $u_{AB}$  des Vierquadrantenstellers.

Für die Regelung eines 4QS wird üblicherweise ein Pulsmustergenerator 3 eingesetzt, der eine von einer Regelung 4 vorgegebene Sollspannung  $u^*$  durch ein Pulsmuster  $S_i$  annähert, mit dem die Brückenzweige des 4QS angesteuert werden. Die nach diesem Pulsmuster  $S_i$  erzeugte Ausgangsspannung  $u_{AB}$  entspricht somit näherungsweise der Sollspannung  $u^*$  der Regelung 4. Im stationären Betrieb wird die Regelung in der Regel eine mit der Netzfrequenz periodische Sollspannung  $u^*$  vorgeben, die keine Spannungsgleichanteile enthält. Vom Vierquadrantensteller 1 werden aber dennoch durch Asymmetrien in der Umrichterpulsung kleine Spannungsgleichanteile erzeugt die im Transformator 2 zu Gleichflüssen aufintegriert werden und eine Sättigung der Eisenwege des Transformators 2 bewirken können. Mit einsetzender Sättigung nimmt der Magnetisierungsstrom in Abhängigkeit vom Magnetmaterial mehr oder minder rasch zu und kann unzulässige Oberschwingungen verursachen oder sogar den Umrichter (bestehend aus den hier gezeigten 4QS 1 und Gleichspannungszwischenkreis mit Kondensator 10 sowie einem hier nicht gezeigten Antriebsstromrichter) durch Überschreitung der zulässigen Stromgrenzen zur Abschaltung zwingen. Da eine Erzeugung von Spannungsgleichanteilen nicht ausgeschlossen werden kann, müssen die Gleichflüsse im Transformator 2 von einer Regelung unterdrückt werden, um eine Sättigung der Eisenwege des Transformators 2 zu vermeiden. Eine Möglichkeit hierfür ist die Erfassung und Unterdrückung der durch die Gleichflüsse erzeugten Stromgleichanteile im umrichterseitigen Strom  $i_2$  (Fig. 2). Da die Gleichflüsse bei noch ungesättigtem Magnetmaterial nur sehr kleine Stromgleichanteile ( $<1\%$  des Nennstroms) erzeugen, muß die Meßwerterfassung des umrichterseitigen Stroms  $i_2$  hinreichend genau sein. Der gemessene Strom kann nun einem Stromgleichanteil-Regler ( $i_0$ -Regler) 5 zugeführt werden, der dessen Gleichanteil durch Einprägung eines geeigneten Spannungsanteils  $\Delta u^*_0$  bei einer resultierenden Sollspannung  $u^*$  unterdrückt. Der  $i_0$ -Regler 5 ist so zu entwerfen, daß dieser im stationären Betrieb keine zusätzlichen Oberschwingungen verursacht und dennoch die Stromgleichanteile innerhalb weniger Grundschwingungsperioden der Sollspannung  $u^*$  ausregelt.

Die einfachste Variante eines  $i_0$ -Reglers ist ein Regler mit Integralanteil (PI-Regler), dem der oszillierende Strommeßwert  $i_2$  ohne jede Filterung als Regelfehler zugeführt wird. Bei entsprechend langsamer Einstellung der Regeldynamik wird der Regler auf die oszillierenden Anteile des Stroms kaum reagieren, eventuelle Gleichanteile jedoch durch seinen Integrator akkumulieren und langsam ausregeln. Nachteil dieser Art der Stromgleichanteil-Regelung ist die geringe Regeldynamik. Eine weitere Möglichkeit ist die Filterung des oszillierenden Strommeßwertes  $i_2$  bevor dieser dem PI-Regler zugeführt wird. Auch mit diesem Lösungsansatz kann nur eine geringe Regeldynamik erreicht werden.

Aus der EP 0 370 388 A2 ist ein Verfahren zur Unterdrückung von Gleichflüssen in Einphasentransformatoren bekannt. Die Einphasentransformatoren sind mit einer oder mehreren Wicklungen an spannungseinprägenden Umrichtern angeschlossen, wobei diese Umrichter von einer zeitdiskreten Regelung gesteuert werden, deren Stellgröße Sollspannungen sind, die durch geeignete Ansteuerung der Umrichter umgesetzt werden. Die Regelung mißt einen Strom mit ausreichender Genauigkeit in einer Wicklung des Transformators, um einen im Magnetmaterial des Einphasentransformators entstehenden Gleichfluß zu erfassen.

Aufgabe der Erfindung ist der Entwurf eines Stromgleichanteil-Reglers ( $i_0$ -Reglers), der den Stromgleichanteil innerhalb weniger Grundschwingungsperioden der Sollspannung  $u^*$  ausregelt, im stationären Betrieb keine zusätzlichen Oberschwingungen verursacht und dennoch robust gegenüber Parameterschwankungen und aufwandsarm in der Realisierung ist.

Diese Aufgabe wird von der Erfindung gemäß den im Anspruch 1 gekennzeichneten Merkmalen gelöst.

Eine vorteilhafte Ausgestaltung des Verfahrens nach der Erfindung ist im Anspruch 2 gekennzeichnet.

Die Erfindung soll im folgenden für ein Ausführungsbeispiel anhand der Zeichnungsfiguren 3 und 4 erläutert werden. Es zeigen

Fig. 3 die Struktur eines zeitdiskreten Regelkreises einer Stromgleichanteil ( $-i_0$ ) Regelung und

Fig. 4 die Struktur des Stromgleichanteil ( $-i_0$ )-Reglers nach der Erfindung.

Gemäß Fig. 3 ist die Regelstrecke 7 des  $i_0$ -Reglers 5 der an das Wechselstromnetz angeschlossene Transformator 2, wobei  $\Delta u^*_0$  die Eingangs- und  $i_2$  die Ausgangsgröße ist. Das Wechselstromnetz kann je nach Schaltzustand recht unterschiedliche Netzverhältnisse aufweisen, die auch das Regelverhalten des  $i_0$ -Reglers 5 beeinflussen. Die vom  $i_0$ -Regler 5 zu erreichenden Anregelzeiten liegen im Bereich weniger Netzperioden. Wird vorausgesetzt, daß aufgrund der geforderten Anregelzeiten die Stellgröße  $\Delta u^*_0$  des  $i_0$ -Reglers 5 im wesentlichen von Frequenzanteilen unterhalb der Netzfrequenz dominiert wird, so genügt für den Entwurf des  $i_0$ -Reglers 5 die Modellierung der Regelstrecke 7 durch eine netzseitig kurzgeschlossene Induktivität  $L_{\sigma 0}$ . Diese Induktivität  $L_{\sigma 0}$  setzt sich dabei aus der Streuinduktivität des Transformators 2 und der Induktivität des Netzes zusammen.  $T_A$  bezeichnet die Abtastzeit der Regelung.

Zur Ermittlung des Stromgleichanteils  $i_{20}$  wird dem  $i_0$ -Regler 5 ein zeitdiskretes Filter 6 mit der Übertragungsfunktion  $F(z)$  vorgeschaltet. Dieses Filter muß beim Reglerentwurf berücksichtigt werden. Da die Netzfrequenz und damit die Frequenz der Grundschwingung des Stroms  $i_2$  etwa bekannt ist, kann als Filter 6 ein Tiefpaßfilter bestimmter Ordnung mit geeigneter Knickfrequenz gewählt werden. Bei variierender Netzfrequenz muß die Knickfrequenz des Filters 6 so

festgelegt werden, daß auch die niedrigste vorkommende Netzfrequenz zuverlässig unterdrückt wird. Mögliche zeitdiskrete Filter sind hier die FIR-Filter (Finite Impulse Response Filter) und IIR-Filter (Infinite Impulse Response Filter). Derartige Filter sind durch die Literaturstelle Oppenheim, A.V.; Schaffer, R.W.: "Digital Signal Processing" Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1975 bekannt. Bezüglich des Reglerentwurfs hat das FIR-Filter gegenüber dem IIR-Filter den Vorteil, daß dieses unabhängig vom verwendeten Filterentwurfsverfahren stabil ist. Weiterhin kann beim Entwurf von FIR-Filtern ohne größere Einschränkungen Linearphasigkeit sichergestellt werden. Ein linearer Phasengang bedeutet eine reine Signalverzögerung ohne Verzerrungen. Bezüglich des Reglerentwurfs ist der linear Phasengang des FIR-Filter in der Regel leichter beherrschbar als der (besonders im Bereich der Knickfrequenz) typischerweise stark nichtlineare Phasengang eines IIR-Filter. Die geringere Steiflankigkeit des FIR-Filter gegenüber dem IIR-Filter kann ohne großen Aufwand durch eine höhere Ordnung ausgeglichen werden.

Ein einfaches FIR-Filter zur Bestimmung des Stromgleichanteils  $i_{20}$  ergibt sich aus folgender Überlegung: Ist der Gleichanteil des Stroms bezüglich einer bestimmten Grundschwingung bekannter Frequenz zu unterdrücken, so kann der Gleichanteil durch Mittelung der Strommeßwerte über genau eine Grundschwingungsperiode berechnet werden. Diese Mittelung kann jeweils nach Verstreichen einer Periode durchgeführt werden oder aber gleitend realisiert werden, um eine schnellere Erfassung des Gleichanteils zu erreichen. Ist die Abtastung der Regelung mit der Grundschwingungsperiode synchronisiert, liegen also immer gleich viele Abtastungen in einer Periode, so entspricht die gleitende Mittelung der abgetasteten Ströme einem FIR-Filter der Form

$$F(z) = \frac{1(z^{N-1} + \dots + 1)}{N z^{N-1}} \quad (1)$$

wobei  $N$  die Zahl der Abtastungen des Stromes pro Periode ist. Eine derartige Synchronisation der Abtastung der Regelung mit der Grundschwingung ist häufig bei pulsmustergesteuerten Regelungsverfahren gegeben, wenn die Pulsfrequenz nur ein geringes Vielfaches der Netzfrequenz beträgt. Der Grund hierfür ist die Synchronisation des Pulsmusters mit dessen modulierten Grundschwingung, um Schwebungseffekte zu vermeiden. Da die Abtastung der Regelung üblicherweise mit dem Pulsmuster synchronisiert ist (Regular Sampling), ist bei synchronen Pulsmustern auch die Abtastung mit der modulierten Grundschwingung synchronisiert.

Das FIR-Filter nach Gleichung (1) ist ein sehr einfaches linearphasiges Filter. Natürlich ist auch der Einsatz von anderen linearphasigen FIR-Filtern denkbar, die z. B. mit Fensterfunktionen oder anderen Entwurfsverfahren (siehe z. B. Oppenheim; Schaffer a.a.O.) entworfen wurden.

Die zeitdiskrete Struktur der Stromgleichanteil-Regelung gemäß Fig. 3 besteht somit aus einem Integrator als Regelstrecke 7, dem FIR-Filter  $F(z)$  6 und dem noch zu entwerfenden Regler 5 mit der Übertragungsfunktion  $G(z)$ , dessen Stellgröße  $\Delta u^*$  um eine Rechenzeit verzögert auf die Strecke wirkt. Der  $i_0$ -Regler 5 sollte einen Integralanteil enthalten, um auch kleine Stromgleichanteile auszuregulieren. Ein stabiles Regelverhalten mit einer relativ geringen Dynamik erzielt bereits ein PI-Regler. Eine höhere Dynamik ist erzielbar, wenn der PI-Regler mit einem zusätzlichen FIR-Filter nach Gleichung (1) erweitert wird, wie es in Fig. 4 gezeigt ist. Der Stromgleichanteil wird zunächst einem PI-Regler 8 zugeführt, der hierzu die interne Stellgröße berechnet. Das zusätzliche FIR-Filter 9, wie es auch zur Ermittlung des Stromgleichanteils eingesetzt werden kann, ermittelt aus den letzten  $N$  Sollspannungen  $\Delta u^*$  der Stromgleichanteil-Regelung die mittlere Sollspannung  $\Delta u^*$ . Diese mittlere Sollspannung  $\Delta u^*$  ist proportional zu einem Stromgleichanteil, der durch Integration der Sollspannungen  $\Delta u^*$  über  $N$  Abtastschritte entstehen würde, wenn keine Störgröße  $u_{st}$  vorhanden wäre. Das FIR-Filter 6 würde diesen aktuellen Stromgleichanteil erst mit einem Verzug ermitteln. Die mittlere Sollspannung wird daher mit dem Faktor  $k_{FIR}$  von der Stellgröße des  $\Delta u^*$  des PI-Reglers 8 subtrahiert, um ein Überspringen der Regelung zu bedämpfen. Die Übertragungsfunktion  $G(z)$  des in Fig. 4 dargestellten  $i_0$ -Reglers 5 lautet damit:

$$G(z) = \frac{\Delta u^*(z)}{c(z)} = \frac{k_p (z - \beta) z^N}{(z - 1) \left( z^N - \frac{k_{FIR}}{N} (z^{N-1} + \dots + 1) \right)} \quad (2)$$

Die Ordnung  $(N-1)$  des zusätzlichen FIR-Filter 9 innerhalb des  $i_0$ -Reglers 5 sollte der Ordnung des zur Ermittlung des Stromgleichanteils  $i_{20}$  verwendeten FIR-Filter 6 entsprechen. Wird für das FIR-Filter 6 die Übertragungsfunktion  $F(z)$  nach (1) verwendet, so ist  $N$  aus (1) auch für den  $i_0$ -Regler 5 mit  $G(z)$  nach (2) zu verwenden.

Mit  $G(z)$  und der Regelungsstruktur nach Fig. 3 kann nun der  $i_0$ -Regler ausgelegt werden. Die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises lautet:

$$H(z) = \frac{i_{20}(z)}{e(z)} = G(z) \frac{1}{z} \frac{T_A}{L_{\sigma 0}} \frac{1}{(z-1)} F(z) \quad (3)$$

$L_{\sigma 0}$  ist mindestens gleich der Streuinduktivität  $L_{\sigma}$  des Einphasentransformators (z. B. eines Bahnnetz-Transformators). Um die Stabilität des  $i_0$ -Reglers 5 bei allen Netzverhältnissen zu erreichen, wird der  $i_0$ -Regler 5 mit der Annahme  $L_{\sigma 0} = L_{\sigma}$  entworfen, denn mit dieser Streuinduktivität ist die Streckenverstärkung maximal.

In der Regel werden sämtliche  $N$  Abtastungen des Strommeßwerts  $i_2$  je Grundschwingungsperiode für die Ermittlung des Stromgleichanteils  $i_{20}$  mit einem geeigneten FIR-Filter 6 und für die Unterdrückung dieses Stromgleichanteils mit dem  $i_0$ -Regler 5 verwendet. Ist die Zahl der Abtastungen relativ hoch (z. B.  $N > 30$ ) und wird für das FIR-Filter 6 ebenfalls eine hohe Ordnung (z. B.  $N-1$ ) gewählt, so bedeutet dies, daß die für einen exakten Reglerentwurf zu betrachtende

Übertragungsfunktion  $\Pi(z)$  nach (3) ebenfalls eine hohe Ordnung hat und somit schwer zu handhaben ist. Es zeigt sich jedoch, daß der Reglerentwurf auch für eine niedrigere Ordnung durchgeführt werden kann, ohne daß hierdurch das Regelverhalten wesentlich beeinflußt wird. Hierzu wird das ITR-Filter 6 mit einer niedrigeren Ordnung ( $\tilde{N}-1$ ) entworfen (z. B.  $\tilde{N} = 12$ ) und die Übertragungsfunktion  $G(z)$  des Reglers (2) für diese niedrigere Ordnung ( $\tilde{N}-1$ ) gebildet (d. h. in (2) wird  $N = \tilde{N}$  eingesetzt). Der Reglerentwurf wird nun beispielsweise anhand von Wurzelortskurven durchgeführt. Die berechneten Reglerparameter  $k_p$ ,  $k_{FIR}$ ,  $\beta$  sind nun auf den tatsächlichen Regler mit der entsprechend höheren Ordnung zu übertragen. Während  $k_p$  und  $k_{FIR}$  weitgehend unabhängig von der Ordnung sind, muß  $\beta$  nach

$$\beta = 1 - \frac{\tilde{N}(1-\tilde{\beta})}{N} \quad (4)$$

auf den tatsächlich verwendeten Parameter  $\beta$  umgerechnet werden.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Unterdrückung von Gleichflüssen in Einphasentransformatoren, die mit einer oder mehreren Wicklungen an spannungseinprägende Umrichter angeschlossen sind, wobei diese Umrichter von einer zeitdiskreten Regelung gesteuert werden, deren Stellgröße Sollspannungen sind, die durch geeignete Ansteuerung der Umrichter umgesetzt werden, und wobei diese Regelung einen Strom mit ausreichender Genauigkeit in einer Wicklung des Transformators mißt, um einen im Magnetmaterial des Einphasentransformators entstehenden Gleichfluß zu erfassen, **dadurch gekennzeichnet**, daß

der Gleichanteil des gemessenen Stroms mit einem linearphasigen ITR-Filter (Finite Impulse Response Filter) ermittelt wird, welches als Tiefpaßfilter mit einer Knickfrequenz entworfen ist, die unterhalb der niedrigsten im stationären Betrieb auftretenden Grundschwingungsfrequenz des gemessenen Stroms liegt, daß der so ermittelte Stromgleichanteil einem Gleichanteil-Regler mit der Z-Übertragungsfunktion

$$G(z) = \frac{\Delta u_0^*(z)}{e(z)} = \frac{k_p (z - \beta) z^N}{(z - 1) \left( z^N - \frac{k_{FIR}}{N} (z^{N-1} + \dots + 1) \right)} \quad (4)$$

zugeführt wird, in der  $k_p$ ,  $k_{FIR}$ ,  $\beta$  Reglerparameter sind und  $N-1$  der Ordnung des ITR-Filters entspricht und wobei die Eingangsgröße  $e$  des Reglers die Regelabweichung ist, die aus der Differenz des Sollwerts des Stromgleichanteils und des mit dem ITR-Filter ermittelten Istwerts des Stromgleichanteils gebildet wird, und wobei die Ausgangsgröße ( $\Delta u_0^*$ ) des Gleichanteil-Reglers zu den Sollspannungen der Regelung addiert wird, und daß dem Gleichanteil-Regler als Sollwert für den Stromgleichanteil eine Null vorgegeben wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß für die Auslegung der Reglerparameter  $k_p$ ,  $k_{FIR}$ ,  $\beta$  des Gleichanteil-Reglers der Einphasentransformator durch seine Streuinduktivität  $L_\sigma$  moduliert werden kann und die zeitdiskrete Übertragungsfunktion  $\Pi(z)$  des offenen Regelkreises unter Berücksichtigung einer Rechenzeit damit

$$H(z) = \frac{i_{20}(z)}{e(z)} = G(z) \frac{1}{z} \frac{T_A}{L_\sigma} \frac{1}{(z-1)} F(z) \quad (5)$$

lautet, wobei  $i_{20}$  der Gleichanteil des am Ausgang des ITR-Filters anliegenden Stromes ist.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

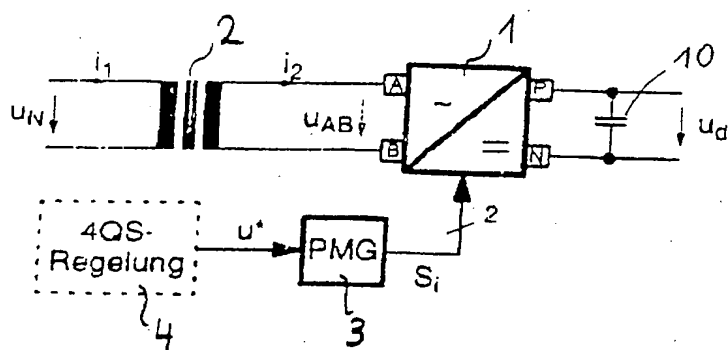


Fig. 1

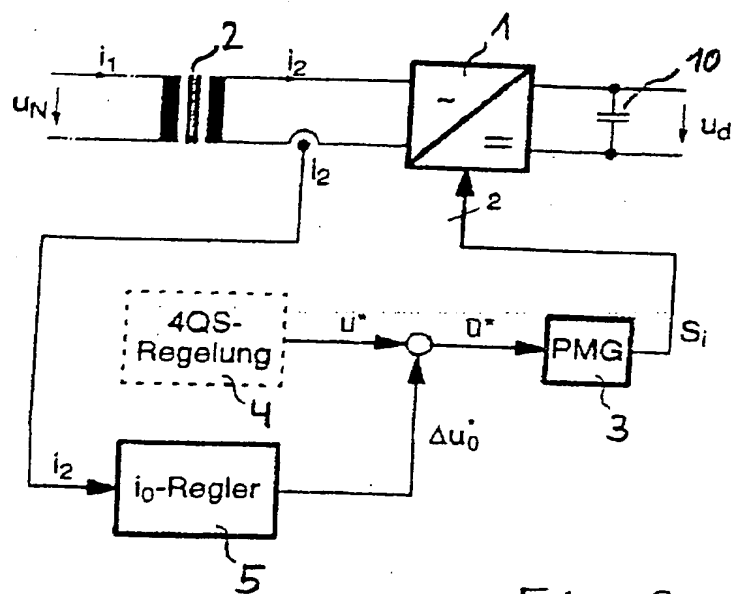


Fig. 2

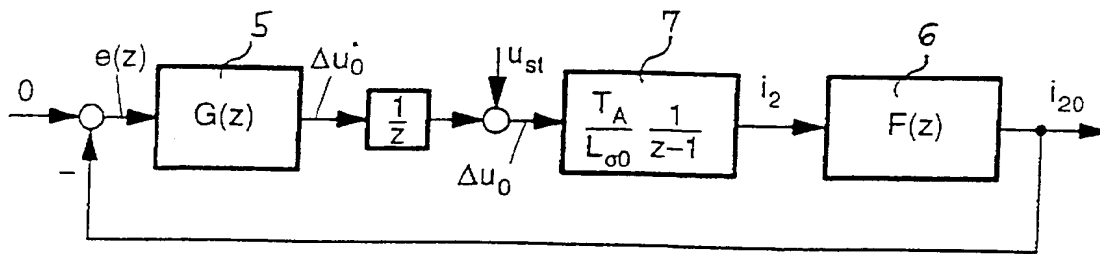


Fig. 3

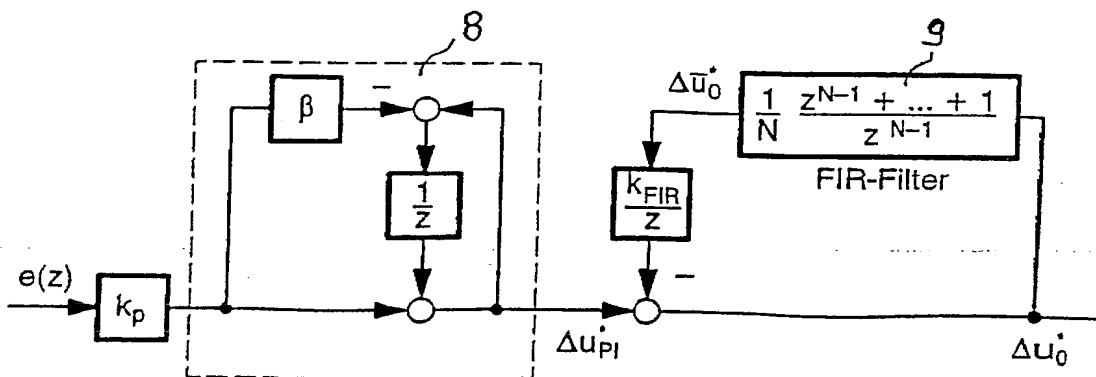


Fig. 4